

## PERHITUNGAN SUHU ELEMEN BAKAR REAKTOR TRIGA 2000 DALAM TABUNG SIPPING TEST MENGGUNAKAN CFD

Sudjatmi K.A.  
Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri – BATAN  
Email: [sudjatmi@batan.go.id](mailto:sudjatmi@batan.go.id)

Diterima editor 15 Januari 2013  
Disetujui untuk publikasi 19 Februari 2013

### ABSTRAK:

**PERHITUNGAN SUHU ELEMEN BAKAR REAKTOR TRIGA 2000 DALAM TABUNG SIPPING TEST MENGGUNAKAN CFD.** Telah dihitung suhu elemen bakar pada perangkat *sipping test* reaktor TRIGA 2000 Bandung. Perhitungan perlu dilakukan untuk memastikan bahwa suhu elemen bakar masih dibawah atau pada batas suhu elemen bakar yang diizinkan pada saat reaktor beroperasi, sehingga dapat dipastikan bahwa pada pelaksanaan pengujian dengan menggunakan perangkat ini, suhu masih dalam batas keselamatan. Perhitungan dilakukan dengan membuat model tabung *sipping test* berisi elemen bakar yang dikelilingi oleh 9 buah elemen bakar, sesuai dengan posisi tabung *sipping test* di teras reaktor, dengan menggunakan GAMBIT. Dimensi model disesuaikan dengan dimensi tabung dan elemen bakar dalam teras reaktor TRIGA 2000 Bandung. Pengoperasian *sipping test* untuk tiap elemen bakar dilakukan selama 30 menit pada daya 300 kW. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dan sebagai inputan disesuaikan dengan parameter reaktor TRIGA 2000. Simulasi dilakukan pada pengoperasian dari 30, 60, 90, 120 150, 180 sampai 210 menit. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa suhu pusat bahan bakar dalam tabung *sipping test* sebesar 236,06 °C, sedangkan suhu dinding elemen bakar adalah sebesar 87,58 °C. Suhu maksimum pusat bahan bakar reaktor TRIGA 2000 pada operasi normal adalah 650 °C, dan tidak diizinkan terjadinya pendidihan di dalam teras reaktor. Jadi dapat disimpulkan bahwa pengoperasian perangkat *sipping test* masih sangat aman karena suhu bahan bakar berada dibawah batasan suhu bahan bakar yang diizinkan pada kondisi operasi normal demikian juga suhu dinding elemen bakar masih dibawah suhu didih air.

Kata kunci: *sipping test*, TRIGA, elemen bakar, CFD

### ABSTRACT:

**CALCULATION OF FUEL ELEMENT TEMPERATURE TRIGA 2000 REACTOR IN SIPPING TEST TUBES USING CFD.** It has been calculated the fuel element temperature in the *sipping test* of Bandung TRIGA 2000 reactor. The calculation needs to be done to ascertain that the fuel element temperatures are below or at the limit of the allowable temperature fuel elements during reactor operation, ensuring that the implementation of the test by using this device, the temperature is still within safety limits. The calculation is done by making a model *sipping test* tubes containing a fuel element surrounded by 9 fuel elements, according to the position *sipping test* tubes in the reactor core, by using Gambit. Dimensional model adapted to the dimensions of the tube and the fuel element in the reactor core of Bandung TRIGA 2000 reactor. *Sipping test* Operation for each fuel element performed for 30 minutes at 300 kW power. Calculations were performed using CFD software and as input adjusted parameters of TRIGA 2000 reactor. Simulations carried out on the operation of the 30, 60, 90, 120 150, 180 and 210 minutes. The calculation result shows that the temperature of the fuel in tubes *sipping test* of 236,06 oC, while the temperature of the wall is 87,58 ° C. The maximum temperature in the fuel center of TRIGA 2000 reactor in normal operation is 650 ° C, and the boiling is not allowed in the reactor. So it can be concluded that the operation of the *sipping test* device are is very safe because the fuel center temperature is below the temperature limits the allowable fuel under normal operating conditions as well as the fuel element wall temperature is below the boiling temperature of water.

Keywords: *sipping test*, TRIGA, fuel element, CFD

## PENDAHULUAN

Salah satu persyaratan dalam keselamatan radiasi dan beroperasinya sebuah reaktor penelitian adalah tidak adanya lepasan radionuklida hasil fisi ke air pendingin reaktor dan udara lingkungan. Radionuklida hasil fisi dapat keluar dari elemen bakar ke dalam air pendingin karena adanya kebocoran pada kelongsong elemen bakar. Deteksi dini lepasnya radionuklida hasil fisi dari elemen bakar ke air pendingin dapat dilakukan dengan pemeriksaan radioaktivitas air pendingin primer [1].

*Sipping test* merupakan salah satu teknik uji tak merusak untuk deteksi integritas kelongsong elemen bakar yaitu dengan mendeteksi dan mengidentifikasi keberadaan radionuklida hasil fisi di dalam air rendaman elemen bakar setelah diiradiasi. Metode ini biasanya diimplementasikan sebagai cara untuk memantau integritas elemen bahan bakar bekas yang disimpan di tempat penyimpanan basah sehingga memungkinkan terjadinya korosi pada periode waktu yang cukup lama. *Sipping test* juga dapat digunakan untuk menyelidiki bahan bakar yang diduga telah mengalami kegagalan selama operasi. Percobaan dilakukan dengan jalan merendam elemen bakar yang akan diperiksa kebocorannya pada tabung yang berisi air dalam periode waktu tertentu, misalnya 4 jam. Air rendaman kemudian diperiksa, apakah air tersebut mengandung nuklida hasil fisi, yang merupakan indikasi terjadi kebocoran atau tidak terjadi kebocoran. Biasanya, keberadaan Cs-137 digunakan sebagai nuklida indikator [1].

Sebagian dari elemen bakar reaktor TRIGA 2000 yang digunakan saat ini ada yang berusia di atas 30 tahun dengan nilai fraksi bakar (*burnup*) yang tinggi yaitu mencapai lebih dari 45%. Berdasarkan usia dan fraksi bakar maka perlu dilakukan pemeriksaan untuk mengetahui integritas kelongsong elemen bakar. Hasil uji integritas kelongsong elemen bakar disamping akan digunakan untuk melihat unjuk kerja elemen bakar juga sebagai antisipasi bahaya radiasi dari kemungkinan adanya lepasan gas hasil fisi ke air pendingin maupun udara.

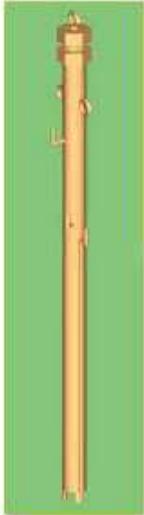
Pemeriksaan kebocoran elemen bakar TRIGA 2000 menggunakan *sipping test* dingin telah dilakukan pada elemen bakar sebanyak 47 buah. Hasil pemeriksaan elemen bakar menggunakan *sipping test* dingin dianggap kurang memuaskan karena tidak mendapatkan hasil yang sama ketika pengujian diulang. Kemudian dilakukan *sipping test* panas yaitu elemen bakar diiradiasi di teras reaktor dan radionuklida hasil fisi yang digunakan sebagai indikator rusaknya integritas kelongsong adalah gas mulia. Jika terjadi kerusakan pada kelongsong elemen bakar maka radionuklida dari golongan gas mulia merupakan hasil fisi yang mudah keluar saat elemen bakar diiradiasi [2,3].

Untuk pelaksanaan *sipping test* panas lebih dulu dibuat perangkat uji integritas elemen bakar reaktor TRIGA 2000. Pada pelaksanaannya, elemen bakar yang direndam di dalam tabung uji diiradiasi pada daya reaktor 300 kW selama 30 menit. Aspek keselamatan tentu saja tidak boleh diabaikan, jadi harus dipertimbangkan paparan radiasi yang diterima pekerja dan diupayakan sekecil mungkin. Selain itu juga perlu dilakukan perhitungan untuk mengetahui apakah suhu kelongsong elemen bakar pada tabung *sipping test* masih berada dibawah batas suhu keselamatan operasi reaktor. Makalah ini membahas perhitungan suhu elemen bakar dalam tabung *sipping test* menggunakan perangkat lunak CFD. Model dibuat sesuai dimensi tabung perangkat *sipping test* dan elemen bakar serta jarak elemen bakar dalam teras reaktor dengan mempergunakan fasilitas gambit yang tersedia pada CFD. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat digunakan sebagai dasar analisis keselamatan penggunaan *sipping test* di reaktor TRIGA 2000.

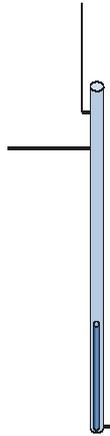
## PERANGKAT *SIPPING TEST* PANAS

Perangkat *sipping test* panas terdiri dari tabung uji, yang terbuat dari bahan baja tahan karat, diameter dalam 50,8 mm, tebal dinding 1,27 mm dan tinggi 4000 mm (Gambar: 1). Tabung ini dilengkapi dengan 3 pipa kecil, yang terbuat juga dari bahan baja tahan karat, berdiameter dalam 1 cm dan tebal dinding 1 mm. Pipa pertama menembus dinding tabung uji pada ketinggian sekitar 250 mm

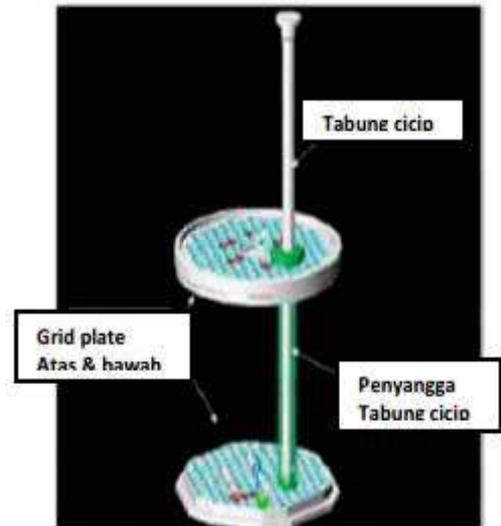
dari ujung atas tabung. Pipa kedua menembus tabung uji pada ketinggian sekitar 500 mm dari ujung atas tabung dan pipa ketiga menembus tabung uji di dasar tabung. Dasar tabung uji tertutup rapat (dilas), sedangkan ujung atasnya, tempat memasukan dan mengeluarkan elemen bakar terdapat penutup tabung.



Gambar 1. Tabung sipping test [3]



Gambar 2. Elemen bakar dalam tabung sipping



Gambar 3. Penempatan tabung sipping[3]

Untuk melakukan sipping test panas perlu dilakukan modifikasi pada teras reaktor. Modifikasi dilakukan agar tabung sipping test dapat dimasukkan ke dalam teras reaktor sehingga elemen bakar yang akan diperiksa dapat diiradiasi sebagaimana elemen bakar lainnya. Karena diameter tabung sipping test lebih besar dari pada ukuran elemen bakar maka diperlukan minimal tiga tempat elemen bakar yang akan digunakan untuk tempat tabung sipping test. Bagian top grid pada posisi elemen bakar D8, D7, E8 dilepas sehingga tiga lubang elemen bakar membentuk segitiga dengan luas rongga yang memungkinkan dapat gunakan sebagai tempat tabung sipping test seperti terlihat pada Gambar 2 dan 3. Elemen bakar yang direndam di dalam tabung uji diiradiasi pada daya reaktor 300 kW selama 30 menit.

## METODOLOGI

Pada makalah ini dilakukan perhitungan suhu elemen bakar dalam tabung sipping test menggunakan perangkat lunak CFD. Program komputer atau perangkat lunak CFD adalah suatu program komputasi untuk memprediksi dan mensimulasikan aliran fluida, perpindahan panas dan fenomena lainnya melalui penyelesaian persamaan-persamaan model matematika. Pada dasarnya persamaan-persamaan fluida dibangun dan dianalisis berdasarkan persamaan-persamaan diferensial parsial yang merepresentasikan hukum-hukum kekekalan massa, momentum dan energi [4, 5].

Persamaan kontinuitas:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (1)$$

Persamaan momentum arah I adalah,

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j') + \rho g \quad (2)$$

dengan  $(\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j') = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$  adalah tegangan.

Notasi indeks  $i = 1, 2, 3, \dots$  dan  $j = 1, 2, 3, \dots$

$\delta_{ij}$  = delta Kronecker

Persamaan energi,

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i h) = - \frac{\partial}{\partial x_i} (k_F + k_t) \frac{\partial T}{\partial x_i} + \bar{u}_i \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

dengan,

$\bar{u}$  = komponen kecepatan rata rata (m/s)

$\rho$  = rapat massa (kg/m<sup>3</sup>)

$g$  = gravitasi ((m/s<sup>2</sup>)

$P$  = tekanan (pascal)

$k_F$  = konduktivitas molekular fluida (W/m<sup>2</sup> K)

$C_p$  = kapasitas panas spesifik (W/K)

$\mu$  = viskositas dinamik fluida (Ns/m<sup>2</sup>)

$\mu_t$  = viskositas turbulen (Ns/m<sup>2</sup>)

$T$  = suhu (K)

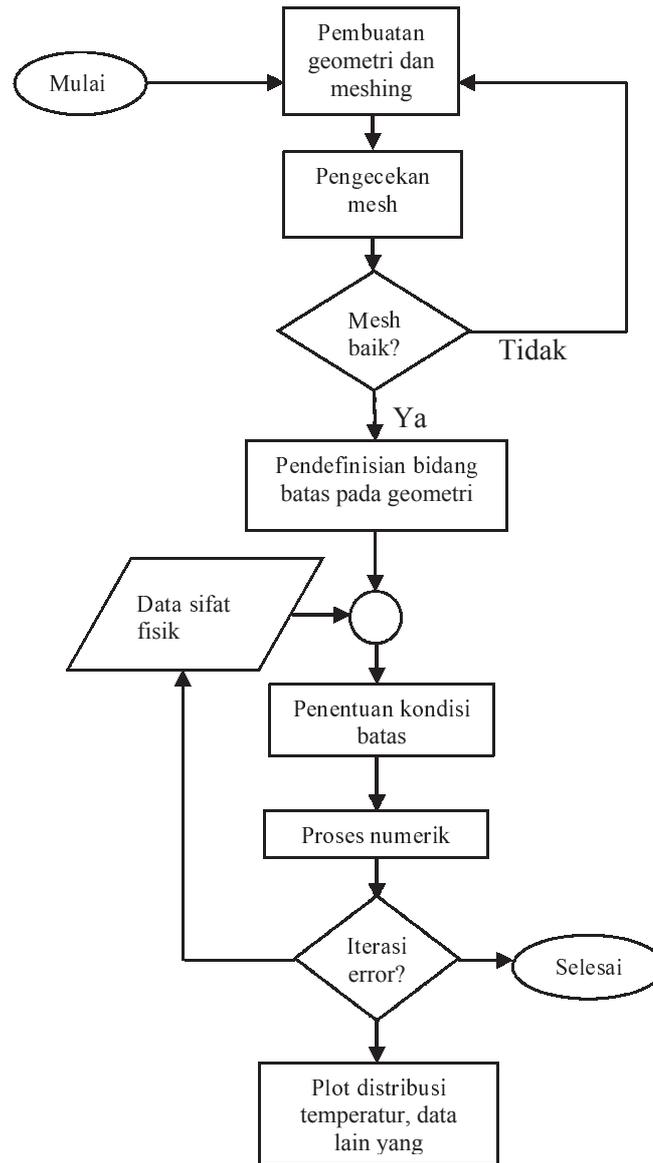
$h = \int_{T_{ref}}^T C_p dT = C_p (T - T_{ref})$  = entalpi (J/kg)

$k_t = C_p \frac{\mu_t}{Pr_t}$  = konduktivitas turbulen

$Pr_t = \frac{C_p \mu_t}{k_t}$  = bilangan Prandtl turbulen

$k$  = energi kinetik turbulen

Tahapan pelaksanaan ketika dilakukan simulasi dengan menggunakan CFD adalah *preprocessing*, *solving* dan *post processing*. Tahapan tersebut dapat dilihat pada diagram alir prosedur simulasi pada Gambar 4.



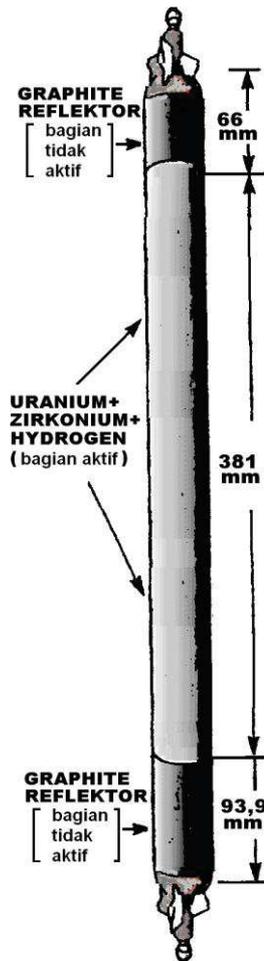
Gambar 4. Diagram alir prosedur simulasi

Pada tahap pertama dibuat model tabung sipping test berisi elemen bakar yang dikelilingi oleh 9 buah elemen bakar, sesuai dengan posisi tabung *sipping test* di teras reaktor, dengan menggunakan GAMBIT. Geometri dan dimensi mengacu pada Gambar 5 dan Tabel 1, yang merupakan gambar dan tabel spesifikasi bahan bakar TRIGA 2000 dan dimensi tabung uji.

Tabel 1: Spesifikasi bahan bakar [6] dan dimensi tabung uji

Dimensi		Spesifikasi	
Panjang keseluruhan bahan bakar		720 mm	
Diameter luar bahan bakar		36,4 mm	
Panjang bahan bakar		381 mm	
Kelongsong:			
	Material	SS-304	
	Diameter luar	37,5 mm	

	Tebal dinding	0,508 mm	
	Panjang	561,3 mm	
Tabung uji			
	Material	SS-304	
	Diameter dalam	50,8 mm	
	Tebal dinding	1,27 mm	
	Panjang	4000 mm	



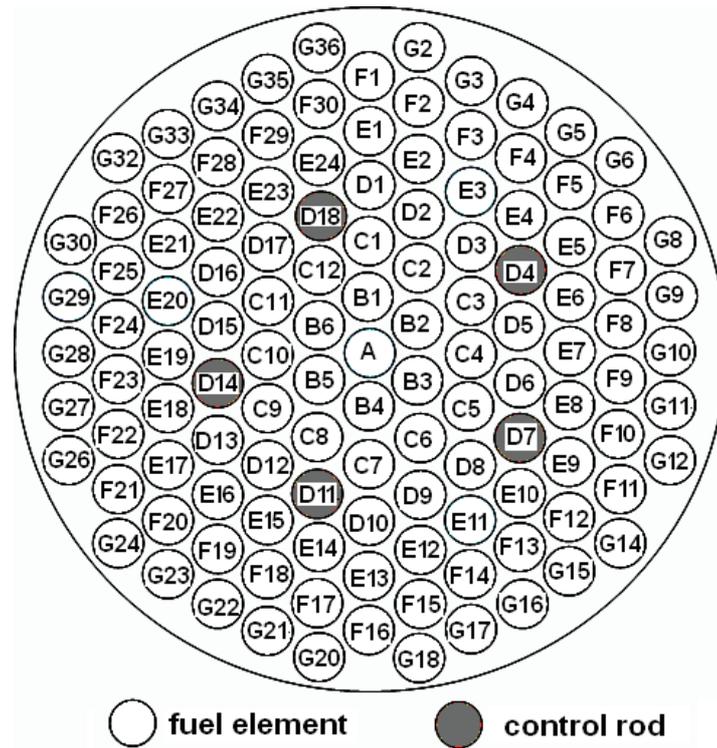
Gambar 5. Elemen bakar TRIGA 2000 [6]

Pada gambar teras seperti ditunjukkan pada Gambar 6 dapat dilihat bahwa pada posisi elemen bakar D8, E10, E11 terdapat fasilitas yang dapat dibuka sehingga dapat digunakan untuk memasukkan tabung *sipping test*.

Setelah membuat geometri, langkah selanjutnya adalah melakukan pembagian obyek menjadi bagian-bagian kecil atau disebut *meshing*.

Pemeriksaan pada mesh perlu dilakukan untuk melihat apakah meshing sudah sesuai. Bila mesh sudah baik, maka pada tahap selanjutnya dilakukan pendefinisian bidang batas pada geometri model.

Tahapan berikutnya adalah penyelesaian dengan mempergunakan CFD. Pada tahap ini dimasukkan sifat fisik serta kondisi batas model yang dibuat. Setelah itu dilakukan perhitungan numerik pada daya 300 kW dan waktu dari 30, 60, 90, 120 150, 180 sampai 210 menit.

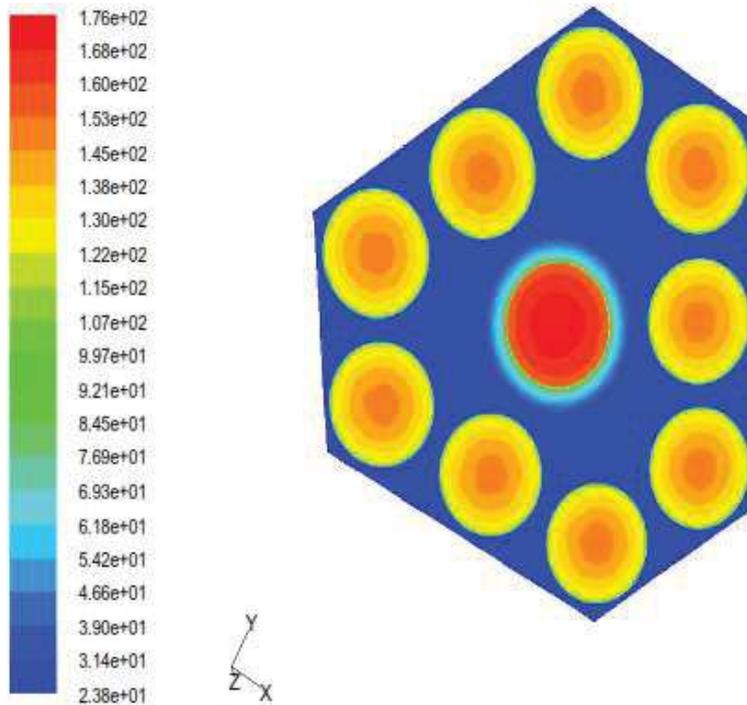


Gambar 6. Posisi elemen bakar pada teras reaktor TRIGA 2000 Bandung [6]

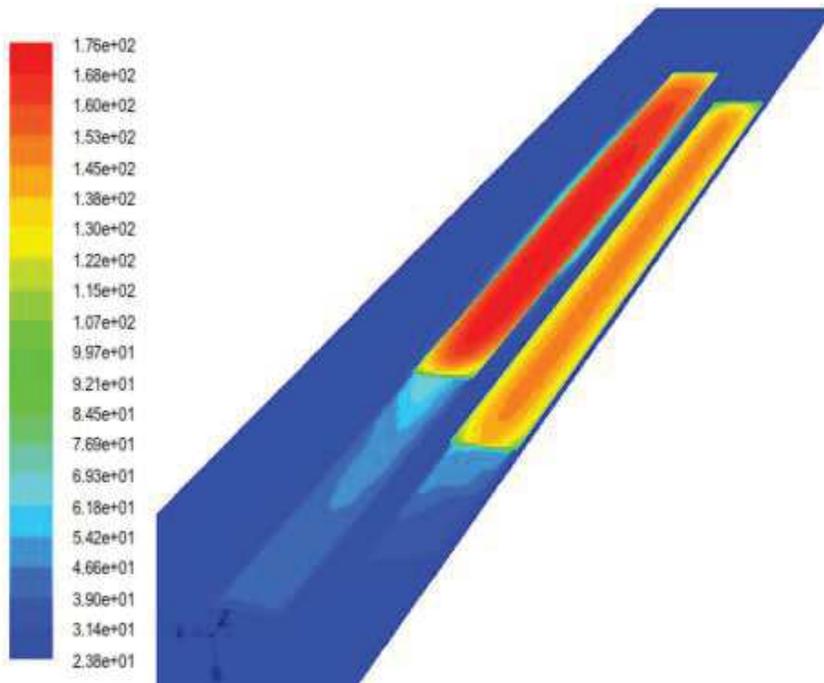
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Potongan horisontal dan vertikal model tabung sipping test yang diisi dengan elemen bakar yang dikelilingi oleh 9 buah elemen bakar seperti yang ditampilkan pada Gambar 7 dan Gambar 8, merupakan hasil dari pemodelan dengan menggunakan gambit dan perhitungan CFD. Gambar 9 adalah gambar dinding bahan bakar, sedangkan Gambar 10 adalah gambar dinding elemen bakar dalam tabung *sipping test* yang dikelilingi oleh 9 buah dinding bahan bakar. Model dibuat dengan bantuan program gambit dan ukuran model disesuaikan dengan ukuran sebenarnya sesuai dengan Gambar 5 dan Tabel 1.

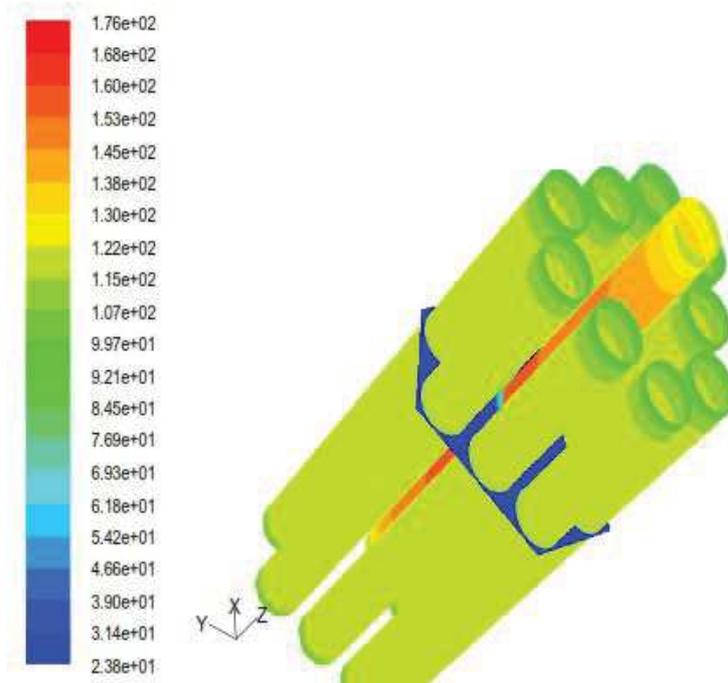
Pada Gambar 7 dan pada Gambar 8, dapat dilihat bahwa dinding elemen bakar di dalam tabung *sipping* berwarna merah tua, sedangkan dinding elemen bakar di sekeliling tabung *sipping* berwarna kuning sampai coklat. Perbedaan warna menunjukkan bahwa terdapat perbedaan suhu pada model yang dibuat. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa suhu dinding elemen bakar di dalam tabung *sipping* lebih tinggi dari pada suhu dinding elemen bakar di luar tabung *sipping*. Suhu air di dalam tabung *sipping* (warna biru muda) lebih tinggi bila dibandingkan dengan suhu air di sekitar elemen bakar dan di luar tabung *sipping*. Hal serupa dapat juga diartikan untuk Gambar 9 dan 10. Pada Gambar 9 dapat dilihat bahwa suhu dinding elemen bakar di dalam tabung *sipping* (berwarna coklat) lebih tinggi dibandingkan dengan suhu dinding elemen bakar di sekelilingnya. Sedangkan pada Gambar 10 dapat dilihat bahwa suhu dinding tabung *sipping* lebih rendah dibandingkan dengan suhu dinding elemen bakar di sekelilingnya, tetapi suhu dinding tabung *sipping* dibagian tengah, yaitu dekat elemen bakar (warna biru muda), lebih tinggi dari pada suhu dinding tabung *sipping* bagian atas (warna biru tua).



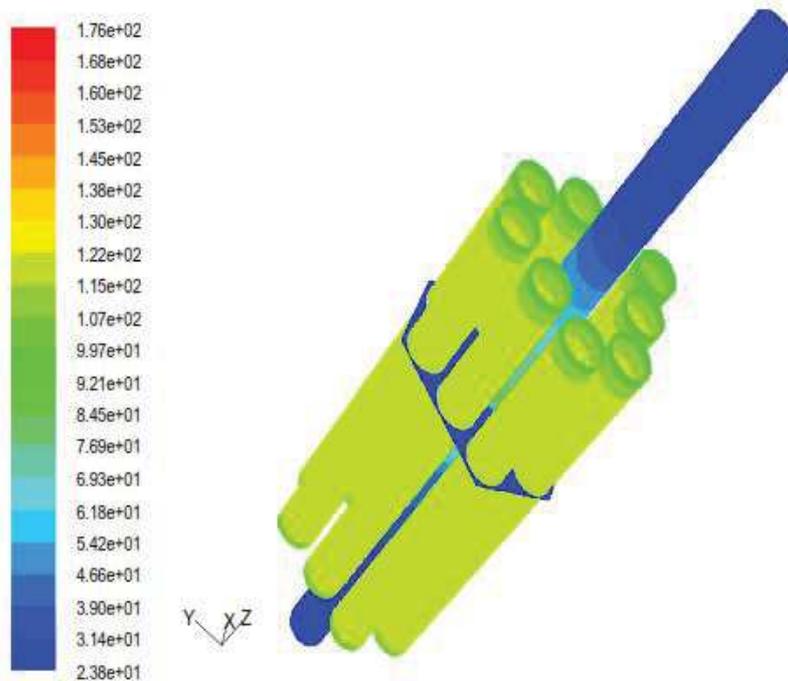
Gambar 7. Potongan horisontal model



Gambar 8. Potongan vertikal model



Gambar 9. Bahan bakar

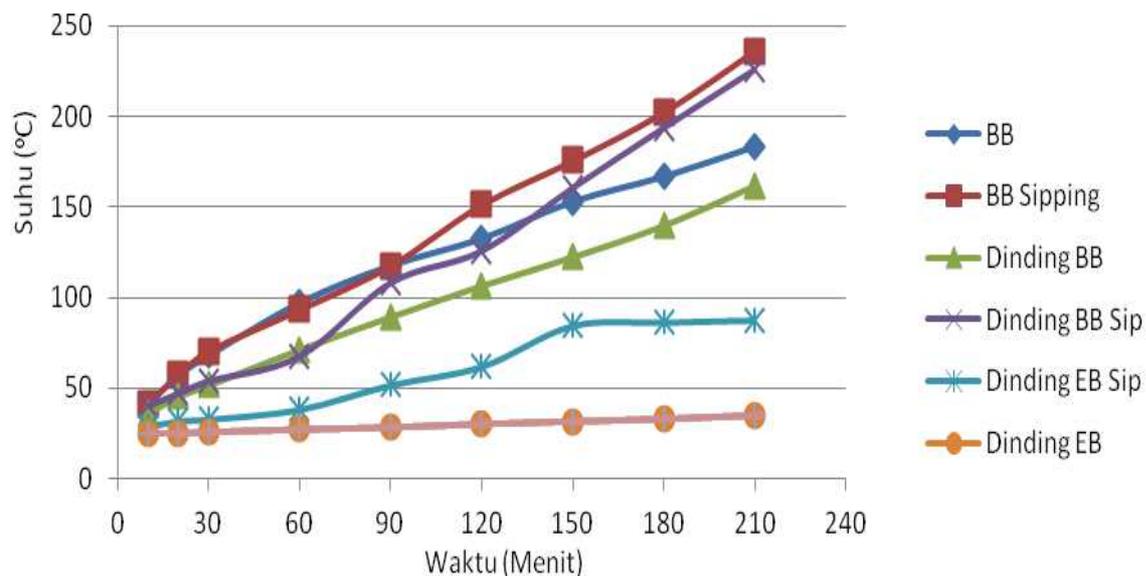


Gambar 10. Tabung *sipping test* dikeilingi oleh 9 buah bahan bakar

Perhitungan suhu elemen bakar dalam tabung *sipping test* dilakukan dengan mengasumsikan reaktor beroperasi pada daya 300 kW, sesuai dengan daya yang digunakan pada saat *sipping test* dilaksanakan. Dari perhitungan distribusi daya, diperoleh bahwa daya terbesar adalah di ring D 10,

sebesar 36,26 kW bila reaktor beroperasi 2000 kW[7]. Berdasarkan perhitungan tersebut, maka diasumsikan bahwa daya pada elemen bakar pada tabung *sipping test* dan daya 9 buah elemen bakar disekitarnya sebesar  $300/2000 \times 36,25 \text{ kW} = 5,4375 \text{ kW}$ . Asumsi ini diambil agar perhitungan memberikan hasil yang cukup konservatif. Simulasi dilakukan pada pengoperasian dari 30, 60, 90, 120, 150, 180, sampai 210 menit.

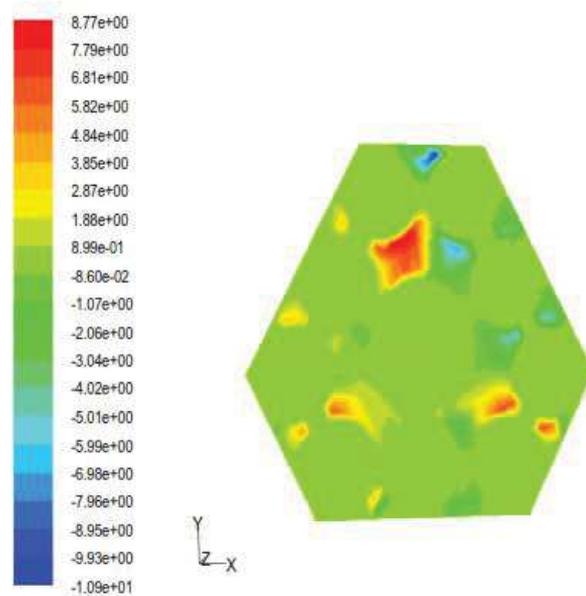
Pada Gambar 11 dapat dilihat bahwa dengan berjalannya waktu suhu pusat bahan bakar dalam tabung *sipping test* naik melebihi kenaikan suhu pusat bahan bakar di luar tabung *sipping test*. Pada menit ke 90, suhu pusat bahan bakar dalam tabung *sipping test* telah melampaui suhu pusat bahan bakar di luar tabung *sipping test*. Suhu terendah terjadi pada dinding elemen bakar di luar tabung *sipping* yaitu berkisar dari 25,2°C pada operasi selama 30 menit dan naik sampai 33,41°C pada operasi selama 210 menit



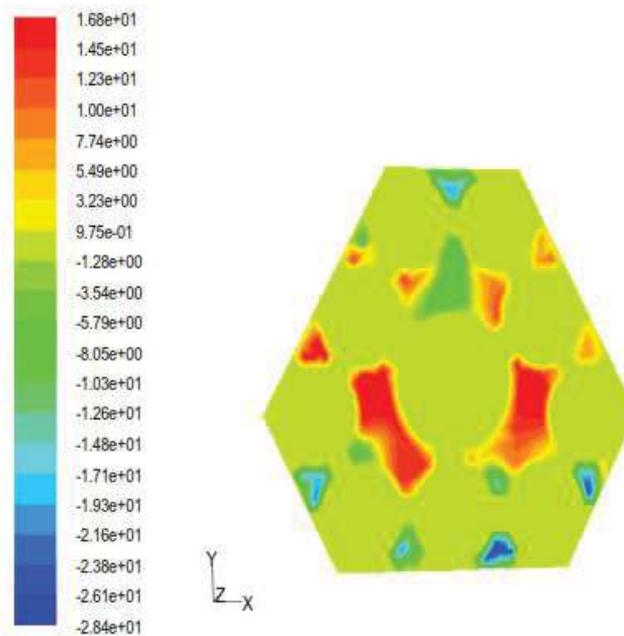
BB adalah bahan bakar  
EB adalah elemen bakar

Gambar 11. Suhu vs waktu hasil perhitungan CFD

Dari hasil pada Gambar 11 dapat dilihat bahwa suhu bahan bakar dalam tabung *sipping test* sebesar 41,54, 57,47, 70,59, 93,56, 117,64, 151,26, 175,55, 202,3, 236,06 °C, sedangkan suhu dinding elemen bakar dalam tabung *sipping test* adalah sebesar 28,92, 32,00, 32,92, 38,31, 51,85, 61,99, 84,52, 86,33 dan 87,58 °C.



Gambar 12. Kecepatan aliran arah radial potongan horisontal di tengah elemen bakar



Gambar 13. Kecepatan aliran arah aksial potongan horisontal di tengah elemen bakar

Pada Gambar 12, yang merupakan gambar irisan horisontal ditengah elemen bakar, dapat dilihat bahwa kecepatan aliran maksimal dalam arah radial adalah 8,7 m/s , sedangkan pada Gambar 13 ditunjukkan bahwa kecepatan aliran kecepatan aliran maksimal pada arah aksial adalah 16,8 m/s. Dari kedua Gambar12 dan 13 dapat dilihat bahwa pada sistim juga terjadi perpindahan panas secara konveksi.

## KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan diperoleh bahwa pada pengoperasian sampai 210 menit atau 3,5 jam, suhu bahan bakar dalam tabung *sipping test* mencapai nilai 236,06 °C, suhu dinding elemen bakar yang berada pada tabung *sipping test* adalah 87,58 °C, sedangkan suhu dinding elemen bakar disekeliling tabung *sipping test* adalah 34,55 °C . Pada operasi normal, suhu bahan bakar reaktor TRIGA 2000 maksimum adalah 650 °C. Berdasarkan hal tersebut dapat disimpulkan bahwa pengoperasian tabung *sipping test* pada daya 300 kW pada reaktor TRIGA 2000 dalam batas aman karena suhu dinding elemen bakar pada tabung *sipping test* masih dibawah suhu pendidihan yang merupakan suhu batas pengoperasian reaktor TRIGA 2000 Bandung dan suhu pusat bahan bakar juga masih dibawah batas suhu bahan bakar pada operasi normal.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Chung, C., Chen, C.Y., Lin, C.S., Yeh, W.W., Lee, C.J. Rapid monitoring of gaseous fission products released from nuclear power stations. *Journal of Rad. Nuc. Chem.*1998; 233: 281 – 284.
2. Sudjatmi, K.A., Rasito, Putranto Ilham Y., Dedi Sumarna. Deteksi kebocoran kelongsong elemen bakar reaktor TRIGA 2000 dengan metode uji cicip. *Prosiding Seminar Keselamatan Nuklir BAPETEN*; Jakarta 2-3 Agustus 2006. p. 850-852
3. Rasito, Sudjatmi K.A., dan P. Ilham Yazid. Uji integritas kelongsong elemen bakar reaktor TRIGA 2000 dengan metode uji cicip panas., *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir*; PTNBR – BATAN Bandung, 3 Juni 2009. p. 96-98
4. Firman T. Dasar dasar menggunakan CFD FLUENT. *Informatika Bandung*; Bandung; 2008. p. 1-2 .
5. Reynaldi Nazar. Evaluasi karakteristik temperatur penukar panas reaktor TRIGA 2000 Bandung untuk berbagai variasi jumlah pelat dengan program komputer CFD. *Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia*. 2008; 11: 37 - 51
6. Anonim. LAK Reaktor TRIGA 2000 Bandung. revisi 3; 2006. p. V.7, 25, 27
7. Sudjatmi K. Perhitungan burn-up elemen bakar reaktor TRIGA 2000 menggunakan PCBURP dan DIF3D. *Prosiding Seminar Sains dan Teknik Nuklir*; Bandung, 14-15 Juni 2005. p. 412-418.